

# ***Modelación bidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con CE-QUAL-W2***

*Marina Arbat Bofill<sup>1</sup>*

*Ingeniera Geóloga. Estudiante de doctorado*

[marina.arbat@upc.edu](mailto:marina.arbat@upc.edu)

*Martí Sánchez Juny<sup>1</sup>*

*Doctor Ingeniero de Caminos. Profesor Titular*

[marti.sanchez@upc.edu](mailto:marti.sanchez@upc.edu)

*Ernest Bladé Castellet<sup>1</sup>*

*Doctor Ingeniero de Caminos. Profesor Colaborador*

[ernest.blade@upc.edu](mailto:ernest.blade@upc.edu)

*Josep Dolz Ripollés<sup>1</sup>*

*Doctor Ingeniero de Caminos. Catedrático de Universidad*

[j.dolz@upc.edu](mailto:j.dolz@upc.edu)

*(1) Grupo de Investigación FLUMEN. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona 1-3 D-1, 08034, Barcelona*

## **1 Introducción**

El presente estudio viene motivado después de la realización de una primera simulación unidimensional mediante DYRESM, con la que se obtuvieron perfiles verticales de temperatura aceptables, sobretudo posteriormente a la optimización de la mayoría de los parámetros influyentes en los cálculos que afectan al programa (Arbat et al., 2009).

El modelo fue capaz de predecir bien la tendencia de los perfiles de temperatura, aunque para el embalse de Ribarroja se evidenciaron dos problemas debidos a la modelación unidimensional: por un lado la marcada diferencia de temperatura entre la salida de Mequinenza y el Segre su tributario principal; y la morfología del embalse, largo y estrecho, que provoca un marcado funcionamiento bidimensional (longitud-profundidad).

Así, para minimizar el error y para simular la evolución diferenciada a lo largo de la longitud del embalse se extendió el estudio a una modelación bidimensional (mediante CE-QUAL-W2), para estudiar el particular régimen hidrodinámico del embalse de Ribarroja, especialmente centrado en su comportamiento térmico.

## **2 Antecedentes**

Este documento muestra algunos de los resultados obtenidos en la modelización de la hidrodinámica del embalse de Ribarroja mediante el modelo bidimensional CE-QUAL-W2 v.3.5. (Cole y Wells, 2006).

Se presentan los datos de entrada y los resultados obtenidos que muestran el comportamiento del embalse. Se han utilizado los mismos datos de entrada que en la simulación unidimensional presentada en Arbat et al. (2009), en concreto en el periodo entre el 16 de Junio y el 15 de Diciembre de 2004.

El modelo CE-QUAL-W2

El modelo numérico CE-QUAL-W2 simula bidimensionalmente el comportamiento hidrodinámico del embalse a partir de series de datos temporales (en este caso diarias) de distintas variables: meteorológicas, hidrológicas, hidráulicas y térmicas, obteniendo resultados de variaciones de densidad, de velocidad vertical y longitudinal a

lo largo del embalse. Se trata de un esquema en diferencias finitas para realizar los cálculos entre las celdas espaciales y temporales definidas por el usuario en que se discretiza la zona de estudio.

### **3 Objetivos**

Los principales objetivos planteados en el presente estudio son:

- Elaboración de los datos de entrada, ficheros de batimetría y control.
- Aplicar el modelo CE-QUAL-W2 al caso particular de Ribarroja para simular su hidrodinámica, especialmente en el periodo de estratificación (verano).
- Analizar la influencia de la calidad de los datos mediante un extensivo análisis de sensibilidad y ajuste de parámetros.

## **4 Modelización numérica del embalse de Ribarroja de Ebro con CE-QUAL-W2**

Con los datos de la red de medidas de campo fija y las distintas tomas de muestras puntuales que se han realizado en varias campañas de campo a lo largo de estos últimos quince años, el Grupo FLUMEN dispone de una extensa y valiosa serie temporal de datos en distintos puntos del embalse de Ribarroja de Ebro. Cabe destacar que desde el año 2007 el Grupo FLUMEN dispone de una plataforma de medida en el embalse de Ribarroja que permite obtener datos meteorológicos en superficie y parámetros hidrodinámicos y de calidad del agua a distintas profundidades, mediante una sonda multiparamétrica. Todos estos datos de campo han sido imprescindibles para el ajuste de un primer modelo bidimensional con CE-QUAL-W2 que muestra los procesos verticales de mezcla-estratificación y su evolución a lo largo de la longitud del embalse.

Para una correcta simulación bidimensional es importante tener una buena batimetría que represente la morfología del vaso en detalle. Así se ajustó un modelo digital del terreno de la batimetría del fondo del embalse a partir de una campaña mediante una sonda multihaz.

La configuración del modelo 2D consiste en preparar la malla de cálculo, establecer las condiciones de contorno, las condiciones iniciales y los parámetros hidrodinámicos requeridos para realizar la simulación.

### **4.1 Segmentación y malla computacional**

La información de configuración del modelo viene dada por el fichero de control (w2\_con.npt) mientras que la malla computacional se especifica en el fichero de batimetría (bth.npt). El modelo requiere definir la batimetría para cada uno de los segmentos en que se discretiza el tramo de estudio además de indicar el sentido del flujo marcando el segmento que se encuentra aguas arriba y el que se encuentra aguas abajo. El fichero de batimetría especifica el promedio de la anchura del segmento para cada capa, la profundidad y la orientación para cada segmento junto con la fricción de fondo y la cota de agua inicial para cada segmento independientemente.

Para la definición del vaso se ha establecido un único cuerpo de agua y un solo cauce. Se ha discretizado el embalse en 27 segmentos, más dos correspondientes a las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo. Mediante el programa WMS (Watershed Modelling System v.8.0) se ha generado una malla irregular triangular (TIN) de la batimetría del embalse con la que se discretizan los segmentos citados y las capas. También considera un ancho medio para cada segmento en planta y para cada capa en perfil, por este motivo se dice que CE-QUAL-W2 es un modelo casi-3D.

Así pues, se ha generado una malla de 29 segmentos (27 segmentos reales y los dos correspondientes a las condiciones de contorno inicial y final) y 36 capas (34 más la inferior y la superior, correspondientes a las condiciones de contorno).

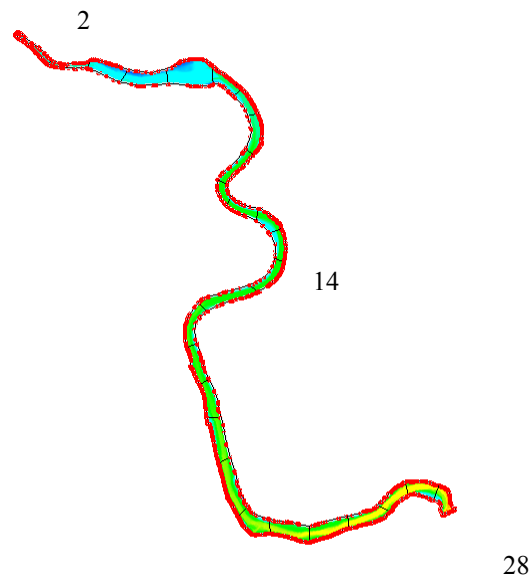


Figura 1 Segmentación de la batimetría del embalse de Ribarroja con WMS 8.0

#### 4.2 Otros ficheros de entrada

Para una simulación básica se precisan los datos siguientes:

- Batimetría: datos medidos de batimetría filtrados generando una malla irregular de triángulos a partir del preprocesador WMS.
- Cota de la lámina libre: para el balance volumétrico.
- Coeficientes de extinción de la luz.
- Datos meteorológicos: viento, velocidad y dirección, temperatura del aire y temperatura del punto de rocío.
- Serie de datos de precipitación.
- Serie de caudales de entrada en la cola del embalse (Salidas de Mequinenza).
- Serie de caudales de entrada correspondientes al tributario (Segre y Cinca).
- Serie de caudales de salida.
- Coeficiente de sombra: se ha tomado por defecto el valor recomendado por CE-QUAL-W2.
- Serie de temperaturas de los caudales de entrada tanto por el caudal principal como para el tributario.

#### 4.3 Condiciones iniciales y condiciones de contorno

CE-QUAL-W2 requiere especificar las condiciones iniciales para los ficheros de batimetría y control. Para cada uno de los segmentos es preciso conocer un perfil vertical de temperatura inicial. En el caso de estudio se ha considerado el perfil inicial obtenido en la simulación unidimensional (González, 2007).

También son necesarios datos de contribuciones/extracciones de caudal al cuerpo de agua del embalse. La componente hidrodinámica del modelo W2, incluyendo la predicción de temperatura, también requiere los datos de la temperatura de entrada y las condiciones meteorológicas.

Los caudales de entrada son los del cauce principal, en concreto el propio río Ebro a la Salida de Mequinenza, y la entrada del tributario, Segre y Cinca, que se unen poco antes de la llegada al embalse de Ribarroja.

Las salidas aguas abajo durante el periodo de estudio son únicamente las de los desagües de fondo e intermedios. Aguas abajo la condición de contorno es la propia presa. Para el periodo de tiempo estudiado solo se tienen salidas por la toma de los desagües de fondo situados a la cota 43.3 m que, aunque son dos, se considera como

un único punto de salida puesto que la dimensión transversal no se considera. De todos modos se han habilitado los ficheros para permitir dividir el caudal entre las salidas por vertido y por desagüe de fondo.

#### 4.4 Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos son otro de los componentes imprescindibles para la modelación de la temperatura en el embalse. Determinan las condiciones de contorno superficiales. Los datos meteorológicos requeridos son: temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, dirección del viento, nubosidad.

## 5 Calibración

Se ha realizado un proceso iterativo para ajustar los valores obtenidos mediante CE-QUAL-W2 con los datos medidos en campo.

En cuanto a la calibración de la temperatura, se ha procedido a realizar un estudio de sensibilidad de los parámetros que pueden influir en la predicción de la temperatura: fricción de fondo, coeficiente de fricción del viento, la temperatura del sedimento del fondo, el coeficiente de intercambio entre el sedimento y el agua i el coeficiente de extinción de la luz. Inicialmente se estimaron la mayoría de estos parámetros no disponibles y en algunos casos se tomaron los valores que aconseja el modelo por defecto.

Se observó que inicialmente las predicciones tenían una tendencia parecida a la realidad, pero era necesario un ajuste de los parámetros de calibración citados, aunque finalmente los perfiles no se ajustan del todo bien en toda la columna de agua. Los perfiles verticales de temperatura se midieron en campo mediante una sonda multiparamétrica, situada en la plataforma de medida propiedad del Grupo FLUMEN justo aguas arriba de la presa. Por este motivo para la comparación vertical se han utilizado los resultados correspondientes al segmento 28.

El viento siempre es el mayor factor gobernante en la simulación hidrodinámica, tanto en módulo velocidad como en dirección, en este caso es importante tener en cuenta si el promedio diario se asimila a los datos horarios, puesto que en un mismo día puede variar mucho la dirección del viento. En las simulaciones realizadas, se observa que un valor de 0.9 para el coeficiente de protección del viento es adecuado, aunque se podría hacer variar por segmentos si se conocieran los valores en distintas zonas.

La radiación solar controla directamente el calentamiento de toda la columna de agua, todos los cálculos realizados con CE-QUAL-W2 en este trabajo utilizan ecuaciones con agua limpia, sin constituyentes, cosa que puede influir notablemente la temperatura de todo el perfil.

Para el coeficiente de extinción de la luz inicialmente se tomó 0.45, valor que propone el propio modelo por defecto. En Salgado (2008) se obtuvieron valores por optimización que resultaron superiores y que oscilan dentro del rango 0.5 – 1.5, por lo que se cambió a 0.5.

Para la variación de la temperatura del sedimento se han estudiado distintos valores, inicialmente se tomó el valor por defecto de 27 °C pero se constató que era demasiado alto, así que después de varios tanteos obtuvo un valor de 14 °C que ajustó mejor los resultados.

Cabe citar que la calibración de los resultados obtenidos solo se basa en perfiles de comparación en una única vertical del embalse; y además el propio modelo asume (Cole y Wells, 2006) que los resultados cercanos a la presa (en este caso la medida se realiza en el último segmento, el 28) pueden tener variaciones del orden de 1 °C en comparación con los casos reales.

## 6 Resultados obtenidos

CE-QUAL-W2 simula bidimensionalmente el comportamiento hidrodinámico del embalse a partir de series de datos temporales, en este caso diarias, de distintas variables: meteorológicas, hidrológicas, hidráulicas, térmicas,... También se han obtenido resultados de variaciones de densidad, de velocidad vertical i longitudinal al lo largo del embalse.

### 6.1 Perfiles longitudinales de temperatura obtenidos

A continuación (figura 2) se presentan las distribuciones de temperatura obtenidas para diversos días entre el 18 de Junio y el 15 de Diciembre, aproximadamente cada 15 días.

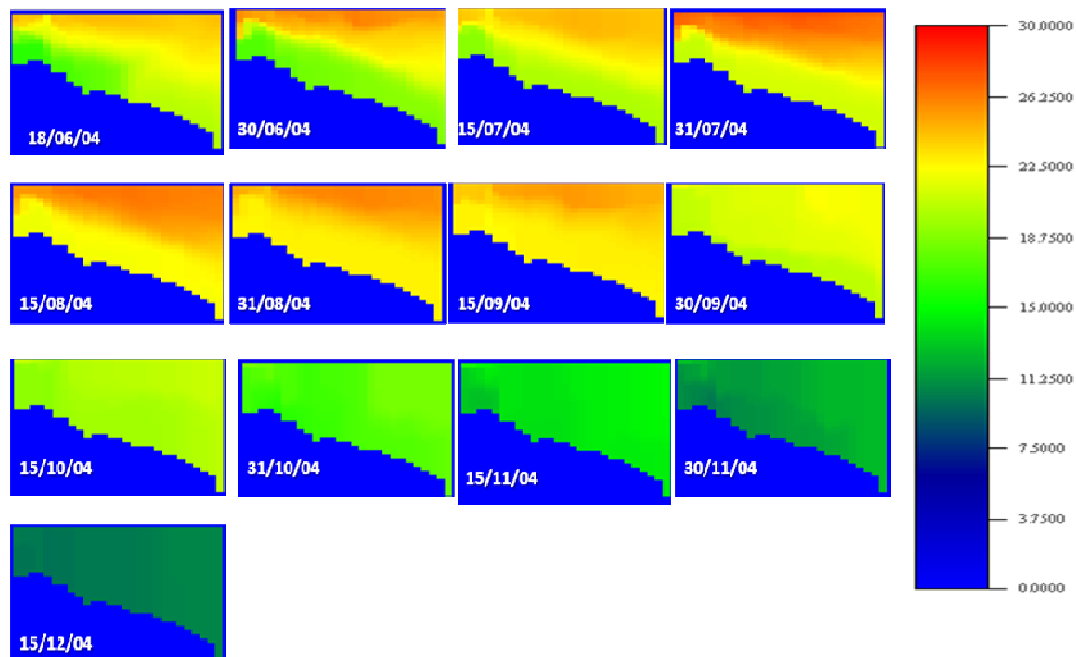


Figura 2 Modelación bidimensional de la evolución de la temperatura en el Embalse de Ribarroja de Ebro

A mediados de Junio el embalse ya se encuentra estratificado; en la modelación presentada viene dado por las condiciones iniciales. Las mínimas temperaturas (capas inferiores de segmentos 2 a 6) son del orden de 15 a 16 °C, mientras que las máximas en superficie son del orden de los 23 °C.

La estratificación es más acusada a finales de Junio, aún así en los perfiles cercanos a la presa se observa un perfil más mezclado. En los primeros segmentos la estratificación es más marcada, debido a las entradas de caudal aguas arriba. Las mínimas temperaturas son del orden de los 16 °C y las máximas, localizadas en la superficie, varía entre 24.5 y 25 °C.

A mediados de Julio se ha calentado todo el embalse en general aunque comparando con el 30 de Junio parece ser que en superficie hay menos temperatura, esto puede ser debido a la meteorología impuesta para el día de cálculo o los días previos. Las mínimas temperaturas han subido hasta los 17-18 °C mientras que las máximas han bajado a los 23.5-24 °C.

A finales de Julio la estratificación es notable, la temperatura mínima (segmentos 2 a 6 a partir de las capas 5-6) es de 19.5 °C aproximadamente; mientras que la máxima, capa superficial, es de 29 °C. Se puede destacar que la zona de los primeros segmentos es la que tiene el epilimnion menos profundo. También cabe comentar que la estratificación es más marcada en los segmentos centrales (7 a 20) y en cambio, cerca de la presa la variación es más gradual.

En Agosto las temperaturas máximas, en superficie, son del orden de los 27-28 °C, mientras que las mínimas son de unos 23 °C, y se sitúan en las partes inferiores de los primeros segmentos. Parece ser que las aguas más frías se mueven alrededor de los 10 metros más profundos de cada segmento; el epilimnion tiene cierta inclinación y su máxima potencia cerca de la presa. La termoclina también está inclinada y es más clara en los segmentos intermedios mientras que el cambio cerca de la presa es más gradual.

A principios de Septiembre la diferencia de temperaturas entre aguas frías y calientes es menor, las aguas profundas ya se han calentado llegando a los 23 °C aproximadamente. Las máximas temperaturas adquiridas en superficie son del orden de los 27 °C. La entrada del Segre junto con el Cinca sigue siendo un poco más fría que las entradas aguas arriba.

A mediados de Septiembre se empieza a notar el enfriamiento de las aguas de entrada, tanto de las salidas de Mequinenza como de las entradas del tributario, se nota en todo el perfil vertical de los segmentos iniciales.

A finales de Septiembre se ha roto la estratificación del embalse, analizando la situación completa se rompe aproximadamente hacia el 20 de Septiembre. Aún así, la parte inferior del embalse aún conserva cierta corriente un poco más fría que la de aguas superiores.

En Octubre se puede observar como el embalse se encuentra totalmente mezclado, a unos 19 °C, los segmentos iniciales quizá un poco más fríos debido a la entrada de aguas frías, un grado menos aproximadamente, y la temperatura va disminuyendo gradualmente hasta el final de la simulación, hasta llegar a los 9 °C o 10 °C.

## 6.2 Comparación de perfiles verticales modelados con perfiles verticales medidos

En la figura 3 se muestra la comparación de los resultados obtenidos con los perfiles reales medidos los días 28 de Julio y 15 de Diciembre de 2004. El ajuste es mejor en periodos de mezcla, en periodos de estratificación se observan mayores divergencias en profundidad que en superficie. Ni con el análisis de sensibilidad realizado se ha conseguido atenuar la diferencia que se observa, en especial, durante la época de estratificación, en la parte inferior, entre los 15 y 25 m de profundidad, del periodo de estratificación del orden de 1-2 °C. Cabe destacar que debido a la modelización se suaviza la tendencia del perfil vertical como se puede observar en el gráfico del 28 de Julio de 2004.

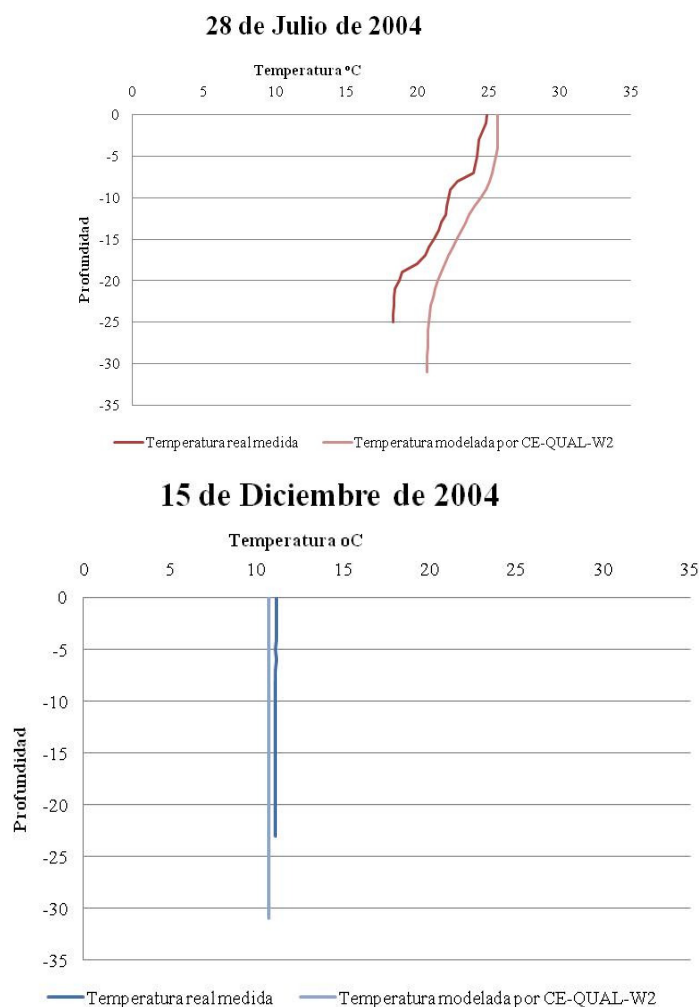


Figura 3

Segmentación de la batimetría del embalse de Ribarroja con WMS 8.0

### 6.3 Comparación de perfiles verticales de temperatura para distintos segmentos

A modo de ejemplo, se presenta la evolución diferencial en distintos puntos del embalse, en concreto en los segmentos 2, 14 y 28. Cabe destacar la importancia de la simulación en la dimensión longitudinal, como se puede ver las diferencias entre los perfiles 2 y 28, separados por unos 30 kilómetros, es destacable, tanto por la profundidad en la que se encuentra la termoclina como por el retardo longitudinal del progreso de calentamiento y enfriamiento.

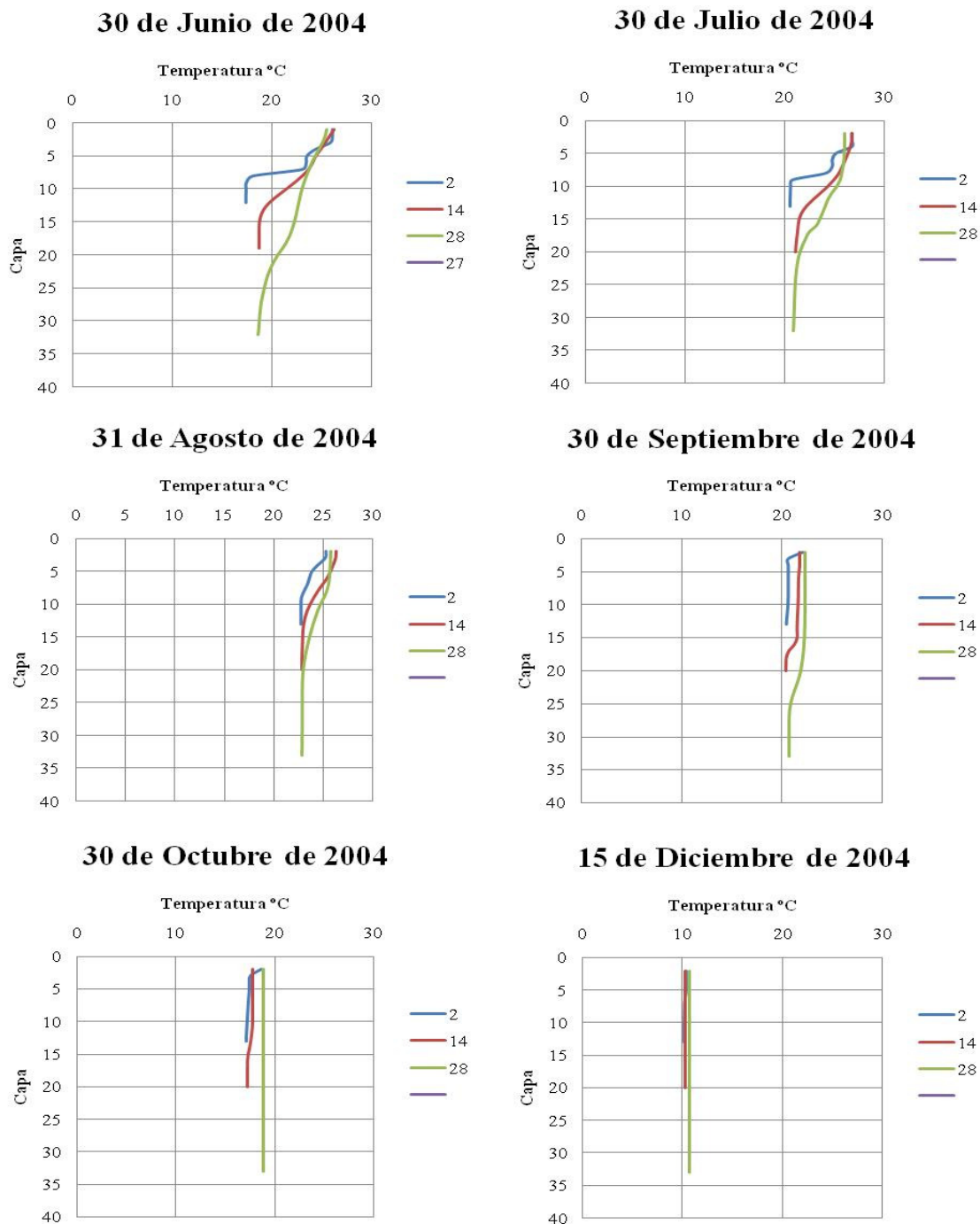


Figura 4 Evolución longitudinal de los perfiles verticales de temperatura para los segmentos 2, 14 y 28 situados en distintos puntos del embalse de Ribarroja

Además de comparar los perfiles verticales de temperatura para los distintos puntos del embalse de Ribarroja en el mismo día, también se presentan las evoluciones de cada uno de estos tres segmentos estudiados durante el periodo de modelación entre el 17/06/04 y el 15/12/04. Con estos se puede observar claramente el proceso de estratificación en verano.

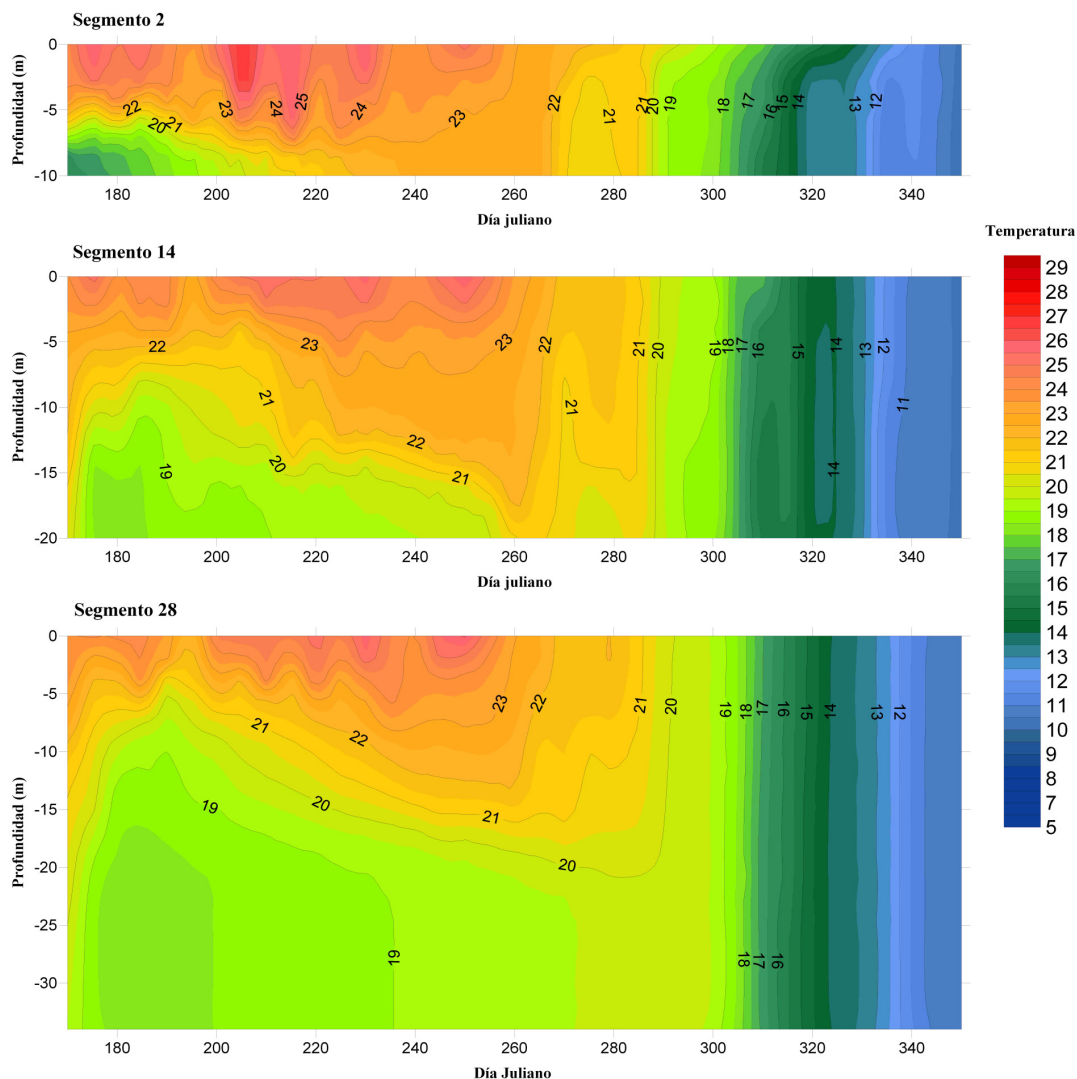


Figura 5 Evolución temporal de la temperatura para los segmentos 2, 14 y 28 a distintos puntos del embalse (ver figura 1)

## 7 Conclusiones

Los promedios diarios definen correctamente la tendencia hidrodinámica del embalse, con un error máximo de 2°C, comparando los perfiles obtenidos de la simulación mediante CE-QUAL-W2 con los medidos en campañas de campo. Aún así, se tendría que estudiar un periodo del que se conociera la evolución continua en distintos puntos del embalse y no sólo los datos en un perfil vertical puntual.

Se puede observar claramente la diferencia a lo largo de la longitud del embalse debida a la complicada geometría del mismo. es importante destacar las variaciones del tramo superior, muy dependientes de la diferencia entre los caudales y las temperaturas de los flujos de entrada del Segre y el Ebro saliendo de la presa de Mequinenza.

Actualmente, se está preparando una red de medidas del comportamiento térmico a lo largo de la longitud del embalse (disposición de termistores a distintos puntos de la longitud del embalse y una boya en el punto central con una cadena vertical de termistores). La idea es modelar con precisión el comportamiento hidrodinámico



vertical y longitudinal del embalse de Ribarroja (periodo de estratificación y enfriamiento 2009), calibrar el modelo y utilizarlo para futuros estudios.

Los segmentos tienen una longitud del orden de 100 a 200 metros mientras que las capas se han discretizado cada metro, se puede comprobar que hay mucha más variación vertical que longitudinal, por lo que se cree que esta discretización del embalse en 28 segmentos es suficiente para una buena modelación de la hidrodinámica.

Los promedios diarios definen bien la tendencia hidrodinámica del embalse, con un error máximo de 2 °C, comparando los perfiles obtenidos con los medidos. Aún así, con sólo dos perfiles reales para un mismo punto no se puede confiar en que todo el periodo se modele bien. Se tendría que estudiar un periodo del que se conocieran distintas medidas en distintos puntos del embalse y no sólo los datos en un perfil vertical.

Para estudiar la calibración del modelo se propone utilizar un periodo en que se disponga de datos de medida en distintos puntos del embalse y además que la resolución temporal del modelo sea inferior a la frecuencia de estudio. Así, el propio modelo propone utilizar series de datos de cada 3 horas para obtener la evolución diaria correctamente.

El modelo CE-QUAL-W2 modeliza realmente bien la evolución de la temperatura de Ribarroja, con cierta diferencia en periodos de estratificación; esta diferencia puede venir dada por distintos parámetros como son los coeficientes de extinción de la luz, de fricción del viento o el Coeficiente de Manning. También se debe considerar la influencia de la discretización y de otros efectos o ajustes numéricos no contemplados.

## **8 Futuras líneas de trabajo**

A partir del estudio realizado se proponen futuras líneas de trabajo, para conocer mejor la hidrodinámica del embalse de Ribarroja de Ebro:

- Mejora de la calidad de los datos y la modelación: se propone utilizar datos cada 3-6 horas. En el estudio que se presenta no se pueden observar las variaciones horarias de temperatura sino que se promedian los resultados.
- Utilización de las series de datos obtenidos con la plataforma instalada por el grupo FLUMEN para el año 2009.
- Posibilidad de modelación de los constituyentes biológicos y parámetros de calidad del agua por ejemplo: Oxígeno disuelto, eutrofización, algas, salinidad,...
- Estudio del conjunto del sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix. El modelo CE-QUAL-W2 es capaz de modelizar sistemas de embalses, y sería interesante estudiar los tres embalses como un único sistema.

## **9 Referencias bibliográficas**

Arbat, M.; González, O.; Salgado, A.; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Dolz, J. (2009). Modelación unidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con DYRESM. Jornadas de ingeniería del Agua. Madrid.

Cole, T. & Wells, S. (2006). CE-QUAL-W2: A two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.5. User Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Washington DC.

Imerito, A (2007) Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM v4 – v4.0 Science Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia.

González, O (2007) Modelización de la hidrodinámica de un embalse. Aplicación al caso del embalse de Ribarroja en el río Ebro. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesina de final de carrera.

LIMNOS (1996) Diagnóstico y gestión ambiental de embalses en el ámbito de la Cuenca Hidrográfica del Ebro. Confederación Hidrográfica del Ebro.

Salgado, A (2008) Optimización de parámetros del modelo hidrodinámico del embalse de Ribarroja en el embalse de Ribarroja en el río Ebro. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesina de final de carrera.

Val, R (2003) Incidencia de los embalses en el comportamiento térmico del río. Caso del sistema de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix en el río Ebro. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis Doctoral.